

旋转圆锥目标动态散斑的时间相关函数

阳志强^{1,2} 吴振森¹ 张耿¹

(¹ 西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071)
(² 西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要 因散射体运动而随时间变化的散斑现象称为动态散斑。研究了激光入射光束与圆锥体旋转中心线垂直情况下的动态散斑空间-时间相关函数,并简化出归一化时间相关函数,表明动态散斑的统计特性与旋转速度、曲率半径、表面微观结构和光学几何结构有关。测量了圆锥体在不同旋转速度下的动态散斑统计特性图像。数值计算聚四氟乙烯和硬铝两种材料的圆锥体在不同速度下的归一化时间相关函数,表明速度越快,其归一化时间相关函数下降得越快,在相同速度下硬铝材料的归一化时间相关函数比聚四氟乙烯材料下降得要快。实验结果与理论推导比较相符。

关键词 散射;动态散斑;时间相关函数;圆锥体;旋转速度

中图分类号 O432.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1029001

Time Correlation Functions of Dynamic Speckle Produced by Rotating Cone Object

Yang Zhiqiang^{1,2} Wu Zhensen¹ Zhang Geng¹

(¹ School of Science, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)
(² School of Photoelectrical Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an, Shaanxi 710032, China)

Abstract Dynamic speckle is a speckle phenomenon that produced by moving diffuser with time. The space-time correlation functions of dynamic speckle and normalized time correlation functions are obtained under the situation that incident laser beam is perpendicular to cone rotation centerline. The space-time correlation functions of dynamic speckle show that statistical properties of dynamic speckle are related to the rotation speed, radius of curvature, micro-structure and optical geometry structure. The dynamic speckle images produced by cone with different rotation speeds are measured. Normalized time correlation functions of polytetrafluoroethylene (PTFE) cone and duralumin cone with different rotation speeds are calculated, which shows that the normalized time correlation functions decrease sharply when the speed increases, and the normalized time correlation functions of duralumin fall faster than that of PTFE at the same rotation speed. The results of experiment are similar to that of formula derivation.

Key words scattering; dynamic speckle; time correlation functions; cone; rotation speed

OCIS codes 170.3340; 170.6920; 280.3340; 280.3420

1 引 言

一束激光光束照射一个具有特定运动状态的散射体,其散斑场的空间分布将随时间变化,由散射体运动引起的散斑光场“缓慢变化”被称为动态散斑^[1-3]。关于动态散斑,主要研究粗糙目标的动态

散斑统计特性,应用动态散斑方式测量目标微运动的速度,其测量方法的差异主要在于散斑强度相关函数或功率谱;另一种测量方法是应用相位光栅将目标的运动进行调制,利用调制后的频率与光栅的空间频率以及目标速度之间的线性关系来获得运动

收稿日期: 2013-03-29; **收到修改稿日期**: 2013-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61172013)

作者简介: 阳志强(1982—),男,博士研究生,主要从事激光散斑测量及其应用方面的研究。

E-mail: yangzhiqiang185@163.com

导师简介: 吴振森(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事无线电物理、光学、成像处理等方面的研究。

E-mail: wuzhs@mail.xidian.edu.cn

目标速度。1993年 Nakamura 等^[4]研究了旋转椭球的散斑统计特性,分析其半径及旋转速度之间的关系。2008年, Semenov^[5]采用修正的强度起伏空间时间相关函数来估计动态散斑图像的相关参数。Semenov 等^[6-7]提出了采用动态散斑进行距离测量的方法。2010年, Shigeo Kubota^[8]给出了对运动目标实时的散斑图像进行平均,有效减小散斑噪声的方法来提高散斑对比度。Zhao Gao 等^[9]提出了一种采用动态散斑测试移动弱散射体的粗糙度。Bronnikova 等^[10]通过测量运动物体的幅值频谱获得旋转速度和表面粗糙度。关于旋转目标的动态散斑的研究,主要针对对称粗糙曲面或微粗糙目标,当激光小范围内照射旋转时,计算在远场接收散斑强度光场的一阶和二阶空间时间互相关函数。通过测量后向散射散斑旋转的自相关函数的微粗糙曲面或目标的旋转速度。Costa 等^[11]研究了圆柱散射问题,给出了粗糙圆柱表面散射形成的散斑与平动目标散射形成的散斑不同特征。Bronnikov^[12]理论推导了平面平动目标动态散斑的统计特性,并通过实验测量出了目标的均方根值粗糙度。周莉莉等^[3]研究了高斯光束照射到恒角速度旋转的圆柱体表面,在非涅耳衍射场形成的动态散斑的统计特性。Wu Yingli 等^[2]研究了照射面积大于圆柱曲面条件下远场衍射区形成的动态散斑统计特性,得到了不同入射条件及不同圆柱时动态散斑强度起伏空间时间归一化相关函数。

许多研究者关注的是平面平动目标形成的动态散斑,国内关于旋转目标的动态散斑的研究相对较少,且旋转目标动态散斑的统计特性研究主要集中在

在理论推导,较少采用实验手段进行研究。本文研究激光入射光束与圆锥体旋转中心线垂直情况下,其动态散斑空间-时间相关函数。搭建了实验光路,测量了圆锥体在不同旋转速度下的动态散斑统计特性图像,数值计算聚四氟乙烯和硬铝两种材料圆锥体在不同速度下的时间相关函数。

2 理论分析

讨论激光入射光束与圆锥体旋转中心线垂直这种特殊情况下,目标旋转形成动态散斑空间-时间相关函数。如图1所示,粗糙圆锥体以角速度 ν 绕轴旋转,目标面用 $\xi(\xi, \eta)$ 表示,观察面用 $x(x, y)$ 来表示,且观察平面上的坐标系固定不动。

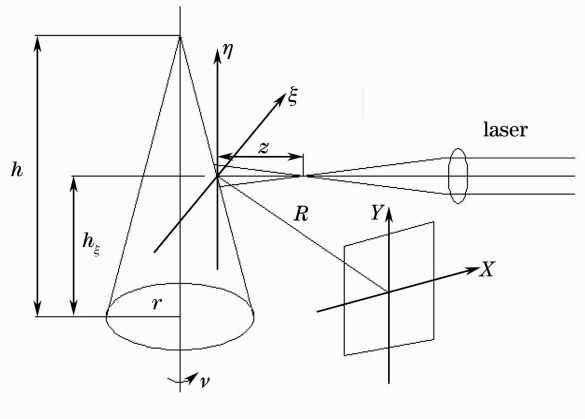


图1 光学系统示意图

Fig. 1 Schematic optical system

在单色直线偏振高斯光束均匀照射下,受到目标表面的微观结构和表面起伏形状的影响,在 t 时刻散射体出射光场可以用 $A(\xi, \eta, t)$ 表示^[3]:

$$A(\xi, \eta, t) = \int (w_0/w) \exp\left(-\frac{\xi^2 + \eta^2}{w^2}\right) \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda\rho}(\xi^2 + \eta^2)\right] \exp\left[-\frac{i2\pi}{\lambda}\left(\frac{\xi^2}{r_\xi^2} + \frac{\eta^2}{r_\eta^2}\right)\right] \cdot \exp[i\varphi(\xi - v_\xi t, \eta - v_\eta t)] \cdot K(\xi, \eta; x, y) d\xi d\eta, \quad (1)$$

式中 $w = w_0(1 + z^2/a^2)^{1/2}$ 是入射光照射到目标光斑的半径, $\rho = z(1 + a^2/z^2)$ 为入射光照射到目标的波面曲率半径,其中 $a = \pi w_0^2/\lambda$, w_0 是激光光源的束腰半径, λ 是光源的波长, v_ξ 和 v_η 分别表示圆锥体在平面 (ξ, η) 上的线速度矢量分量, r_ξ 和 r_η 分别表示圆锥体沿 ξ 方向和 η 方向的曲率半径。 $K(\xi, \eta; x, y)$ 为被测表面到观察面的空间传播权函数,可表示为

$$K(\xi, \eta; x, y) = (i/\lambda R) \exp[-(i\pi/\lambda R)(x^2 + y^2)] \exp[-(i\pi/\lambda R)(\xi^2 + \eta^2)] \exp[(i2\pi/\lambda R)(x\xi + y\eta)], \quad (2)$$

由于圆锥形绕着 η 轴旋转, r_ξ 和 r_η 可以表示为

$$r_\xi = r \frac{h - h_\xi}{h} = r(1 - h_\xi/h), \quad r_\eta \rightarrow \infty. \quad (3)$$

v_ξ 和 v_η 分别可取为

$$v_\xi = |\nu r_\xi|, \quad v_\eta = 0, \quad (4)$$

取 $\tau = t_1 - t_2$, 在观察屏上的两个点 $r_1(x_1, y_1)$ 和 $r_2(x_2, y_2)$ 的散斑光强起伏的空间-时间交叉相关函数表示为

$$R_{\Delta I}(x_1, x_2, y_1, y_2, \tau) = \langle A(x_1, y_1, t_1) A^*(x_1, y_1, t_1) \rangle = \left(\frac{\omega_0}{w} \right)^2 \left(\frac{1}{\lambda R} \right)^2 \exp[-(i\pi/\lambda R)(x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2)] \times \\ \iiint \exp\left(-\frac{\xi_1^2 - \xi_2^2 + \eta_1^2 - \eta_2^2}{w^2}\right) \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda \rho}(\xi_1^2 - \xi_2^2 + \eta_1^2 - \eta_2^2)\right] \exp\left[-\frac{i2\pi}{\lambda}\left(\frac{\xi_1^2 - \xi_2^2}{r_\xi^2} + \frac{\eta_1^2 - \eta_2^2}{r_\eta^2}\right)\right] \times \\ \{\exp[i\varphi(\xi_1 - v_\xi t_1, \eta_1 - v_\eta t_1)] - \exp[i\varphi(\xi_2 - v_\xi t_2, \eta_2 - v_\eta t_2)]\} \times \\ \exp[-(i\pi/\lambda R)(\xi_1^2 - \xi_2^2 + \eta_1^2 - \eta_2^2)] \exp[(i2\pi/\lambda R)(x_1 \xi_1 - x_2 \xi_2 + y_1 \eta_1 - y_2 \eta_2)] d\xi_1 d\xi_2 d\eta_1 d\eta_2. \quad (5)$$

设 $x_1 + x_2 = 2x_c, y_1 + y_2 = 2y_c, x_1 - x_2 = x_d, y_1 - y_2 = y_d$, 且取近似:

$$\exp[i\varphi(\xi_1 - v_\xi t_1, \eta_1 - v_\eta t_1)] - \exp[i\varphi(\xi_2 - v_\xi t_2, \eta_2 - v_\eta t_2)] \approx \exp\{-\alpha^2 \delta^2 T^{-1}[(\xi_1 - \xi_2 - v_\xi \tau)^2 + (\eta_1 - \eta_2 - v_\eta \tau)^2]\}, \quad (6)$$

式中 $\alpha = (2\pi \cos \theta)/\lambda, \theta$ 为入射角, δ 是一个与目标表面相关的参数, 表示为目标的表面粗糙度, T 表示的是相关长度. 将(5)式进一步计算和简化可得:

$$R_{\Delta I}(x_1, x_2, y_1, y_2, \tau) = \frac{(\pi w)^4}{\lambda^4 R^4 (pq)} \left(\frac{\omega_0}{w} \right)^4 \exp\left[-\frac{2\alpha^2 \delta^2 v_\xi^2 \tau^2}{qT^2} \left(\frac{1}{w^2} + \frac{\pi^2 w^2 c_\xi^2}{\lambda^2 R^2} \right)\right] \cdot \\ \exp\left(\frac{4\pi^2 w^2 \alpha^2 \delta^2 v_\xi \tau c_\xi x_d}{q\lambda^2 R^2 T^2}\right) \exp\left\{-\frac{\pi^2}{q\lambda^2 R^2} \left[\left(1 + \frac{2w^2 \alpha^2 \delta^2}{T^2}\right) x_d^2 + 4x_c^2 \right]\right\} \cdot \\ \exp\left\{-\frac{\pi^2}{p\lambda^2 R^2} \left[\left(1 + \frac{2w^2 \alpha^2 \delta^2}{T^2}\right) y_d^2 + 4y_c^2 \right]\right\}. \quad (7)$$

式中

$$p = \frac{1}{w^2} + \frac{\pi^2 w^2 c_\eta^2}{\lambda^2 R^2} + \frac{2\alpha^2 \delta^2}{T^2}, \quad q = \frac{1}{w^2} + \frac{\pi^2 w^2 c_\xi^2}{\lambda^2 R^2} + \frac{2\alpha^2 \delta^2}{T^2}, \\ c_\xi = \frac{R}{\rho} + 1 - \frac{2R}{r_\xi} = \frac{R}{\rho} + 1 - \frac{2Rh_\xi}{r(h-h_\xi)}, \quad c_\eta = \frac{R}{\rho} + 1, \quad (8)$$

归一化可得到粗糙体动态散斑的空间-时间交叉相关度:

$$\gamma_{\Delta I}(x_1, x_2, y_1, y_2, \tau) = \frac{R_{\Delta I}(x_1, x_2, y_1, y_2, \tau)}{R_{\Delta I}(0, 0, 0, 0, 0)} = \exp\left[-\frac{2\alpha^2 \delta^2 v_\xi^2 \tau^2}{qT^2} \left(\frac{1}{w^2} + \frac{\pi^2 w^2 c_\xi^2}{\lambda^2 R^2} \right)\right] \exp\left(\frac{4\pi^2 w^2 \alpha^2 \delta^2 c_\xi v_\xi \tau x_d}{q\lambda^2 R^2 T^2}\right) \times \\ \exp\left\{-\frac{\pi^2}{q\lambda^2 R^2} \left[\left(1 + \frac{2w^2 \alpha^2 \delta^2}{T^2}\right) x_d^2 + 4x_c^2 \right]\right\} \exp\left\{-\frac{\pi^2}{p\lambda^2 R^2} \left[\left(1 + \frac{2w^2 \alpha^2 \delta^2}{T^2}\right) y_d^2 + 4y_c^2 \right]\right\}. \quad (9)$$

从(9)式可以看出空间时间相关函数同观察面上观察点的位置与距离、被测物体的旋转速度、曲率半径、表面微观结构和光学几何结构有关。

当 $x_c = x_d = y_c = y_d = 0$ 时, 动态散斑的时间相关函数可表示为

$$\gamma_{\Delta I}(0, 0, \tau) = \exp\left[-\frac{2\alpha^2 \delta^2 v_\xi^2 \tau^2}{qT^2} \left(\frac{1}{w^2} + \frac{\pi^2 w^2 c_\xi^2}{\lambda^2 R^2} \right)\right]. \quad (10)$$

同样将 $\gamma_{\Delta I}(0, 0, \tau) = e^{-1}$ 时对应的 τ 定义为动态散斑的相关时间 τ_c , 即可表示为

$$\tau_c = \frac{T}{\alpha \delta |v_\xi|} \left\{ q / \left[2 \left(\frac{1}{w^2} + \frac{\pi^2 w^2 c_\xi^2}{\lambda^2 R^2} \right) \right] \right\}^{1/2}. \quad (11)$$

(11)式表示高斯光束照射情况下, 通过自由空间传播形成的动态散斑的时间相关特性, 其相关时间与线速度分量 v_ξ 成反比, 其比例系数由散斑的表面微

观结构、物体的曲率半径及照明条件等参数决定。

3 实 验

实验所采用的光路如图 2 所示, 选用波长为 633 nm 的激光光源, 探测器采用 MotionBLITZ EoSens Cube7 高速采集系统. 光源的光斑大小为 1.5 mm, 同时采用扩束透镜组进行了 10 倍扩束, 并加入了一个 $\phi 12$ mm 口径的孔径光阑以拦挡边缘光斑. 探测器前面放置了一个正透镜, 以模拟产生近似远场条件. 目标垂直安装在旋转平台上, 并保证目标可以绕其旋转中心线旋转, 其中旋转速度可以调整。

选用聚四氟乙烯材料的圆锥体和硬铝材料的圆锥体进行实验, 其中聚四氟乙烯材料的圆锥体的底面

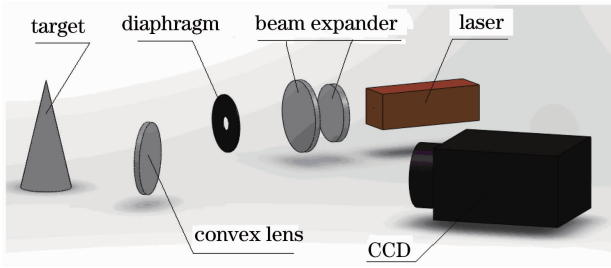


图 2 实验光路图

Fig. 2 Experimental optical path

半径为 30 mm,圆锥总高度为 100 mm,底面到入射光斑中心点距离为 20 mm。硬铝材料的圆锥体的底面半径为 30 mm,圆锥总高度为 75 mm,底面到入射光斑中心点距离为 30 mm。分别测量了聚四氟乙烯材料和硬铝材料的圆锥体在不同角速度下的动态散斑图像,其中聚四氟乙烯材料和硬铝材料圆锥体在角速度为 1 r/min 时动态散斑图像分别如图 3 和图 4 所示。图 3 与图 4 中每个图之间的时间间隔为 1/15000 s,其中图(a)为起始散斑图,图(b)为 1/15000 s 时刻散斑图,图(c)为 2/15000 s 时刻散斑图,图(d)为 3/15000 s 时刻散斑图。

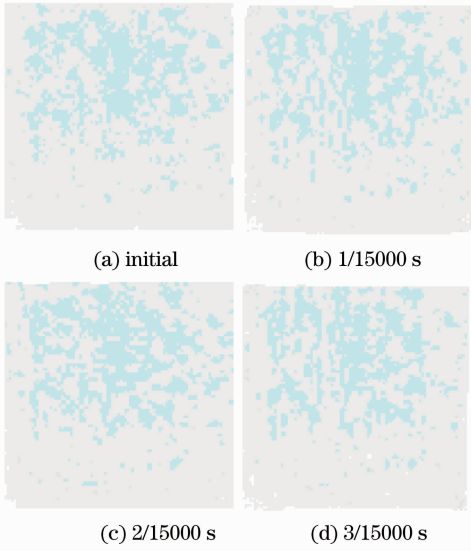


图 3 聚四氟乙烯材料圆锥体动态散斑图

Fig. 3 Dynamic speckle of PTFE cone

从图 3 和图 4 两种材料的圆锥体在不同时刻产生的散斑图像中可以看出,图像的变化方向与圆锥体的运动方向保持一致,且动态散斑图像变化的快慢与圆锥的旋转运动速度是有联系的,数值计算动态散斑的时间相关函数,可以反映目标旋转速度的特征。

4 数据处理和结果分析

为了验证旋转圆锥体动态散斑时间相关函数公

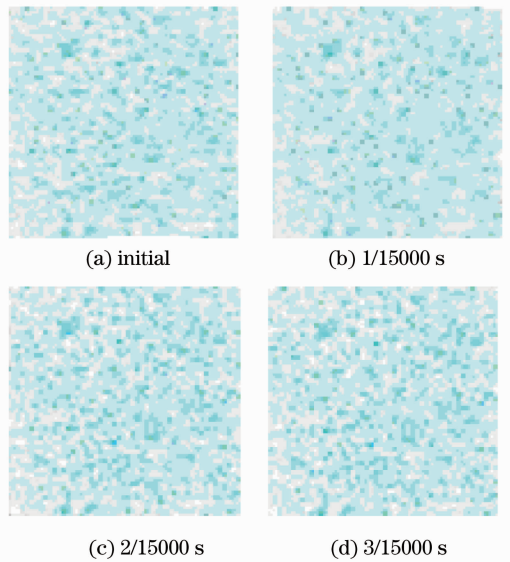


图 4 硬铝材料圆锥体动态散斑图

Fig. 4 Dynamic speckle of duralumin cone

式的正确性,将计算的聚四氟乙烯材料圆锥体的动态散斑归一化时间相关函数与实验结果作对比。如图 5 所示,取激光光源入射波长为 633 nm,束腰半径为 0.5 mm,束腰位置到目标的垂直距离为 30 mm,探测器与目标距离为无穷远。目标为圆锥体,其底面半径为 30 mm,圆锥总高度为 100 mm,光斑照射到目标高度位置为 20 mm,圆锥体旋转速度为 4 r/s。从图 5 中可以看出,利用公式计算模拟的旋转圆锥体动态散斑归一化时间相关函数结果与实验数据相符,其微小偏差主要由于目标表面在机械加工留下的凹槽印造成均匀散射,且目标在旋转过程中存在一定的震动,在旋转过程中旋转轴线会偏离理论旋转中心线,因此,归一化时间相关函数受到目标运动姿态的影响,对其进行深入的研究,可以找出归一化时间相关函数与运动姿态之间的联系,

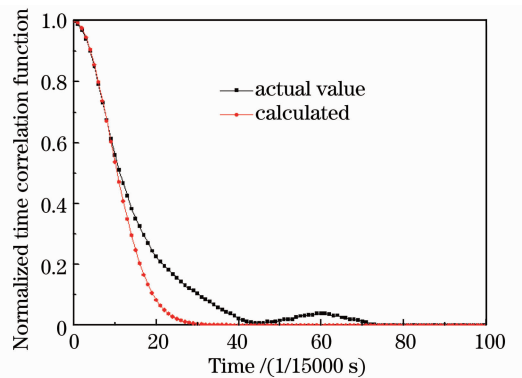


图 5 理论计算与实验结果对比图

Fig. 5 Comparison chart of theoretical and experimental results

以实现微运动的探测。

图 6 和图 7 分别为聚四氟乙烯材料和硬铝材料圆锥体在不同速度下实验所得动态散斑时间相关函数曲线。从图中可以看出,随着速度越大,其归一化时间相关函数曲线下降的越快,这说明时间相关函数是与目标的运动速度是相关的。由于聚四氟乙烯材料的圆锥体表面散射效果较差,导致散斑图像存在较多的黑斑,即散斑图像上没有光强,因此其归一化时间相关性函数不能下降到 0,其数值保持在 0.2 以上。硬铝材料的圆锥体表面加工比较均匀,且其表面散射效果相对于其他材料较好,其散斑图像很少存在黑斑现象,因此其归一化时间相关函数值会迅速下降为 0。由于目标的表面不是一个理想的散射体,因此其归一化时间相关函数曲线不再是一条平滑的曲线,会出现一些偏差。同时,从图 6 和图 7 中可以看出,归一化时间相关函数与圆锥体的表面粗糙度以及相关长度等诸多因素是相关的,因此,通过对动态散斑的研究,可以实现对圆锥体表面粗糙度等相关参数的推算。

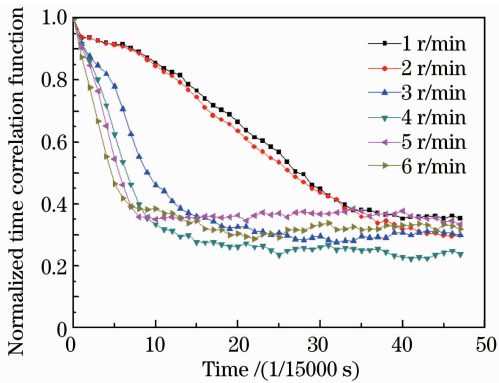


图 6 聚四氟乙烯圆锥体时间相关曲线

Fig. 6 Time correlation curves of PTFE cone

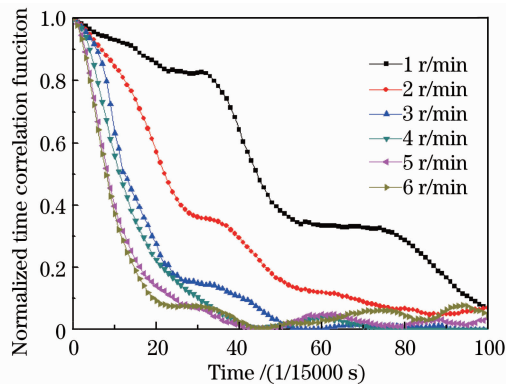


图 7 硬铝圆锥体时间相关曲线

Fig. 7 Time correlation curves of duralumin cone

5 结 论

根据粗糙面散射理论研究了激光入射光束与圆锥体旋转中心线垂直情况下,旋转圆锥体经自由空间在远场观察面上所产生的动态散斑统计特性,研究了空间时间相关函数和简化的归一化时间相关函数,并讨论散斑的时间-空间互相关函数的影响因素。搭建了动态散斑实验测量系统,分别测量激光入射光束与圆锥体旋转中心线垂直情况下,聚四氟乙烯材料和硬铝材料在不同旋转角速度的动态激光散斑。数值计算了动态散斑的归一化时间相关函数,分析了材料和旋转角速度对归一化时间相关函数的影响,以用于分析目标的微运动特征。实验结果与理论推导比较相符,表明速度越快,其归一化时间相关函数下降得越快,在相同速度下硬铝材料的归一化时间相关函数比聚四氟乙烯材料下降得要快。

参 考 文 献

- 1 Serguei V Miridonov, Igor Sidorov, Ervin Nippolainen, *et al.*. Accuracy of measuring systems using dynamic speckles [J]. *J Opt Soc Am A*, 2009, 26(4): 745-753.
- 2 Wu Yingli, Wu Zhensen, Zhang Geng. Statistical property of dynamic speckles produced by rotating cylinder object [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(2): 331-336.
- 3 Zhou Lili, Zhao Xuezheng, Wang Weijie, *et al.*. Statistical properties analysis of dynamic speckles produced by a rotating cylindrical surface [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(2): 60-63.
周莉莉, 赵学增, 王伟杰, 等. 旋转柱面产生动态散斑的统计特性分析[J]. *光电工程*, 2005, 32(2): 60-63.
- 4 T Nakamura, T Asakura. Statistical properties of integrated dynamic speckles produced by a rotating spheroidal object [J]. *Optics*, 1993, 24(3): 135-140.
- 5 D V Semenov. Statistical properties of dynamic speckles formed by a deflecting laser beam [J]. *Opt Express*, 2008, 16(2): 1238-1249.
- 6 D V Semenov, E Nippolainen, A A Kamshilin. Fast distance measurements by use of dynamic speckles [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(3): 248-250.
- 7 D V Semenov, I Sidorov, E Nippolainen. Distance sensing to rough semitransparent and multiscattering materials using dynamic speckles [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(28): 5266-5273.
- 8 Shigeo Kubota. Sensitivity evaluation of dynamic speckle activity measurements using clustering methods [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(23): 4385-4391.
- 9 Zhao Gao, Xuezheng Zhao. Roughness measurement of moving weak-scattering surface by dynamic speckle image [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(5): 668-677.
- 10 V N Bronnikova, M M Kalugin. Measuring the parameters of vibrations and surface roughness, using the frequency spectrum of the intensity fluctuations of scattered radiation [J]. *J Opt Technol*, 2009, 76(11): 697-701.
- 11 German Da Costa, Jose Ferrari. Anisotropic speckle patterns in the light scattered by rough cylindrical surfaces [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(21): 5231-5237.
- 12 V I Bronnikov. Spatial structure of radiation, scattered rough surface, and dependence of performances of dynamic speckle on size of roughness [C]. *SPIE*, 2007, 6594: 65940L

栏目编辑: 李文洁